

Dispositivos de Conmutación en Criogenia para Conmutadores de Fase 180°

Enrique Villa, Beatriz Aja, Luisa de la Fuente, Eduardo Artal
villae@unican.es, ajab@unican.es, fuenterm@unican.es, artale@unican.es
 Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria
 Plaza de la Ciencia s/n, 39005 Santander, Cantabria

Resumen- This work is focused on the analysis of cryogenic performance of diodes, for their use as switching devices in a wideband 180° phase switch circuit. Two kind of diodes, both with low equivalent series resistance and low capacitance, are characterized: a silicon *p-i-n* diode HPND-4005 and a gallium arsenide Schottky diode MA4E2037. The 180° phase switch is designed in hybrid technology working in the Ka-band. Their behaviour is described at room temperature and at cryogenics (15 K). Both diodes are assembled in the phase switch and cryogenic performance is described, showing a broadband response (more than 40% of relative bandwidth at 30 GHz) with low insertion loss for an error in phase of less than 2°.

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se han ido desarrollando diversos proyectos de radioastronomía, con el objetivo de medir la radiación del fondo cósmico de microondas (CMB) para su caracterización, así como de otras emisiones existentes en la galaxia. El interés científico en conocer de manera más detallada el CMB es debido a que es considerado como una de las evidencias que sustentan la teoría del Big Bang del origen del Universo. Los receptores diseñados para las diferentes misiones, bien espaciales bien terrenas, responden a diversos esquemas [1]-[3], siendo los conmutadores de fase 180° elementos esenciales. La función de estos circuitos en el receptor es introducir un cambio preciso de fase de 180° en las señales con el objetivo de poder cancelar las fluctuaciones de baja frecuencia de ganancia y temperatura de ruido existentes en las cadenas de amplificación y, de esta manera, conseguir reducir el ruido 1/f, que podría llegar a enmascarar la señal medida [4], [5]. Con el fin de conseguir dicha reducción del ruido 1/f, los conmutadores de fase suelen ir al principio de la cadena del receptor, como uno de los primeros subsistemas que conforman el mismo.

Los receptores de radioastronomía suelen estar divididos en dos módulos, que se diferencian, entre otras características, por la temperatura a la que operan: el primero de ellos trabaja a temperatura criogénica, mientras que el segundo lo hace a temperatura ambiente. Esto afecta de manera directa al diseño del conmutador de fase, ya que al ser uno de los primeros dispositivos en la cadena del receptor, suele funcionar a temperatura criogénica. En función de la temperatura esperada de funcionamiento, las opciones tecnológicas para el diseño así como el comportamiento obtenido son diferentes.

Uno de los condicionantes que debe tener el conmutador de fase es un bajo nivel de pérdidas de inserción para

minimizar su contribución a la temperatura de ruido total del sistema. Por otra parte, y como es conocido, las características de los sustratos a temperaturas criogénicas cambian de forma sustancial respecto a temperatura ambiente [6], aumentando la conductividad de los materiales lo que reduce las pérdidas. De manera análoga, los dispositivos activos también se ven seriamente afectados bajo condiciones de criogenia, por lo que aparece la necesidad de caracterizarlos a estas temperaturas.

El trabajo que aquí se presenta por tanto, realiza un estudio a temperaturas criogénicas de dos diodos comerciales, uno tipo *p-i-n* de silicio y otro Schottky de arseniuro de galio, para su inserción como elemento de conmutación en un circuito conmutador de fase, presentando el funcionamiento del circuito a temperatura criogénica con ambos dispositivos, así como la respuesta de los mismos.

II. CONMUTADOR DE FASE 180°

El diseño está basado en tecnología híbrida, con líneas coplanares de longitud finita en los planos de masa y sin metalización inferior (FGCPW), combinadas con líneas slotline. El diseño está realizado para que cubra la banda de 26 a 36 GHz. En el circuito se insertarán los elementos de conmutación para obtener una diferencia de fase de 180° en función de la polarización de dichos dispositivos. Un mayor detalle del funcionamiento del circuito se encuentra en [7]. En la Fig. 1 se muestra un esquema del circuito y la situación de los elementos de conmutación, mientras que en la Tabla 1 se definen los valores de impedancias implementadas.

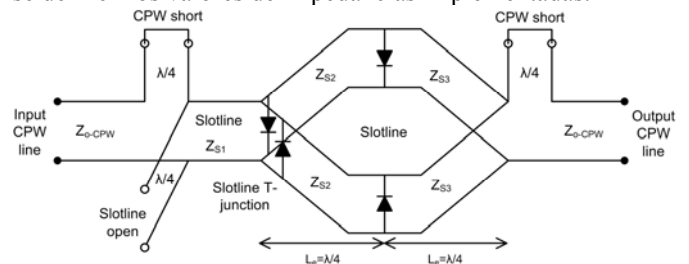


Fig. 1. Esquema del conmutador de fase

Referencia	Z (Ohm)	Tecnología
Z_{0-CPW}	50	FGCPW
Z_{s1}	70	Slotline
Z_{s2}	85	Slotline
Z_{s3}	100	Slotline

Tabla 1. Impedancias del circuito

Dentro de los diferentes sustratos disponibles, y enfocado a su uso en criogenia, se debe escoger uno que presente una alta conductividad térmica. El sustrato utilizado es alúmina ($h=10$ mil, $\epsilon_r=9.9$), que presenta una conductividad térmica de $7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a 10 K [6]. La fina capa de metalización que presenta la alúmina ($3 \mu\text{m}$) también facilita la realización del circuito debido a las pequeñas dimensiones de las diferentes líneas de transmisión. En la Fig. 2 se puede ver una imagen del circuito en alúmina, diseñado para que trabaje en la banda Ka y, debido a los requerimientos que los receptores para radioastronomía poseen en cuanto a ancho de banda, con respuesta en banda ancha.

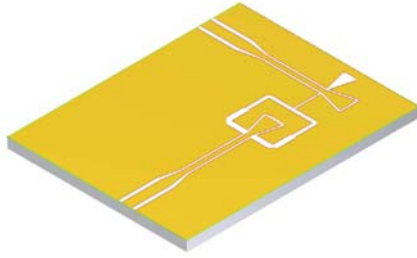


Fig. 2. Vista artística del circuito

III. ELEMENTOS DE CONMUTACIÓN EN CRIOGENIA

Como elementos de conmutación para la consecución de un cambio de fase de 180° en la señal de microondas, se ha optado por la utilización de diodos. Dada la topología escogida para la realización del circuito, se facilita la inserción de los elementos de conmutación en el mismo. El estado del circuito estará modulado por una señal de DC que intercambiará el estado de los diodos, pasando de directa a inversa y viceversa. En la Fig. 3 se muestra el montaje de los diodos en configuración antiparalela dos a dos, mientras que en la Tabla 2 se detalla el estado de los diodos que definen el camino de propagación. La señal de polarización se aplica en la pista común a todos los diodos.

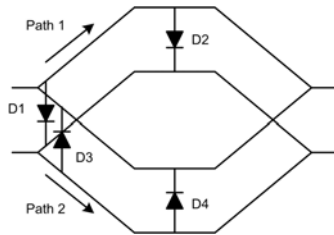


Fig. 3. Configuración diodos

V_{bias}	Estado diodos	Transmisión
$V > 0$	$D1, D2$ off $D3, D4$ on	Path 1
$V < 0$	$D1, D2$ on $D3, D4$ off	Path 2

Tabla 2. Definición del camino de propagación

Para minimizar el efecto que puedan introducir en el circuito los diodos, deben cumplir ciertos requerimientos, como que presenten una baja resistencia serie equivalente en su estado en directa, mientras que en inversa deberán presentar una baja capacidad. De este modo, las pérdidas derivadas de la inserción de los diodos como conmutadores serán bajas.

Se ha realizado el conmutador de fase con dos tipos de diodos diferentes, pero ambos cumpliendo las especificaciones anteriormente citadas. El primer tipo es un diodo $p-i-n$ de silicio, mientras que el segundo es un diodo Schottky de arseniuro de galio. El primero de ellos es un tipo de diodo ampliamente utilizado para aplicaciones de conmutación, mientras que el segundo se utiliza como alternativa viable debido a las ventajas que presenta y que se explicarán más adelante.

Otro aspecto a tener en cuenta es el nivel de potencia que se va a manejar. Al tratarse de un circuito que conforma un receptor para radioastronomía, el nivel de potencia va a ser muy bajo, con lo que ambos tipos de diodos son adecuados para esta aplicación.

Al funcionar en un conmutador de fase, un factor importante es la máxima velocidad de conmutación, parámetro que viene marcado por su tiempo de recuperación en inversa (t_{rr}). Cuando el dispositivo pasa de estar polarizado en directa a inversa, la corriente que circula por el diodo no se puede anular de manera inmediata, debiendo esperar un tiempo para volver a tener la distribución de cargas en equilibrio. Este tiempo es el tiempo de recuperación en inversa. Este es otro motivo para la utilización de diodos Schottky como elemento de conmutación, debido a que las uniones Schottky presentan un tiempo de recuperación casi despreciable frente al de los diodos $p-i-n$, con lo que la velocidad de conmutación podría ser más elevada.

Dada la utilización a temperaturas criogénicas, los dispositivos deben cumplir también el requisito de tener un bajo consumo de potencia en criogenia, ya que en caso contrario provocarían el calentamiento del receptor.

A. Diodo $p-i-n$ HPND-4005 a temperatura criogénica

Se ha escogido como diodo $p-i-n$ el modelo HPND-4005 de Agilent Technologies. Los valores típicos ofrecidos por el fabricante a temperatura ambiente son los siguientes: presenta una resistencia en directa de $R_S=4.7 \Omega$ para una corriente de $I=20 \text{ mA}$, mientras que en inversa una capacidad de $C=0.017 \text{ pF}$. En la Fig. 4 se presenta la medida del diodo respecto a masa para diferentes consumos, en directa e inversa a una temperatura de 15 K , mientras que en la Tabla 3 se muestran sus valores equivalentes.

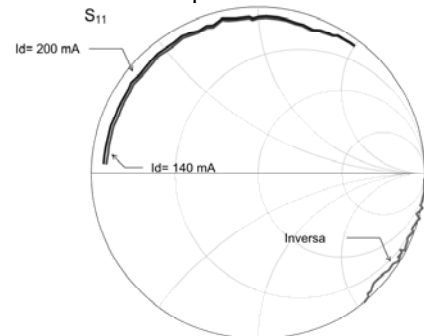


Fig. 4. Diodo HPND-4005 a 15 K en el rango 1 a 40 GHz

Estado diodo	Polarización	$R (\Omega)$	$C (\text{pF})$
Directa	140 mA	2.5	-
	200 mA	2.3	
Inversa	-1.506 V	-	0.05

Tabla 3. Resistencia y condensador equivalente del diodo a 15 K

B. Diodos Schottky MA4E2037 a temperatura criogénica

Se ha escogido como diodo Schottky el modelo MA4E2037 de MACOM. Los valores típicos ofrecidos por el fabricante son: una resistencia en directa de valor $R_s=4\ \Omega$ para una corriente de $I=10\text{ mA}$, mientras que en inversa una capacidad de $C=0.05\text{ pF}$. Estos valores también son descritos a temperatura ambiente. En la Fig. 5 se presenta la medida del diodo respecto a masa para diferentes consumos, en directa e inversa a 15 K, y en la Tabla 4 sus valores equivalentes.

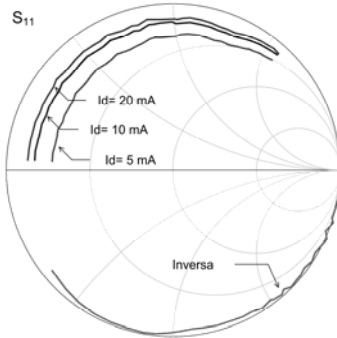


Fig. 5. Diodo MA4E2037 a 15 K en el rango 1 a 40 GHz

Estado diodo	Polarización	R (Ω)	C (pF)
Directa	5 mA	8	-
	10 mA	5	
	20 mA	4	
Inversa	-1.506 V	-	0.075

Tabla 4. Resistencia y condensador equivalente del diodo a 15 K

IV. MONTAJE DE LOS CONMUTADORES DE FASE

Para el montaje de los conmutadores de fase se ha diseñado un chasis con acceso en conector coaxial para su interconexión con otros módulos. La caja se ha fabricado en latón, que presenta una conductividad térmica de $10\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a 10 K, que hará que el gradiente de temperatura entre el módulo y la alúmina sea despreciable. De la misma manera, y aprovechando su alta conductividad térmica a temperaturas criogénicas, el circuito se ha pegado a la caja con una pasta de soldadura basada en indio [8], Indalloy 290 (composición 97% In, 3% Ag) de Indium Corporation®. Asimismo, debido al proceso de enfriado, y con el fin de evitar cualquier tipo de fractura, se han utilizado 'sliding contacts' en la transición de coaxial a línea coplanar. En la Fig. 6 se muestra el montaje en una de las cajas, en este caso con diodos *p-i-n*.

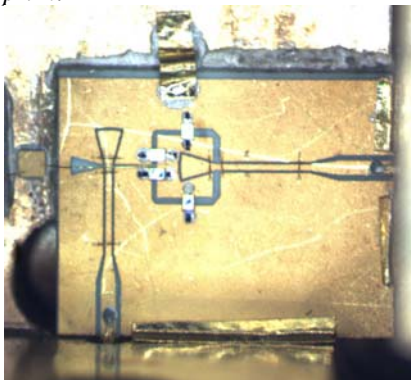


Fig. 6. Montaje del circuito en la caja

V. CARACTERIZACIÓN CRIOGÉNICA DEL CIRCUITO

La medida del conmutador con ambos diodos como elemento de conmutación se ha realizado en un criostato. La obtención de una medida precisa de parámetros de Scattering en el interior de un criostato es complicado, ya que no hay acceso directo a los puertos del dispositivo a medir. La opción que se ha adoptado para realizar las medidas es fijar el plano de referencia en el exterior del criostato y, por medio de unos pasamuros en conector 2.4 mm, diseñados para trabajar en condiciones de vacío, obtener la respuesta del dispositivo. Este proceso nos va a permitir obtener la magnitud de las pérdidas de transmisión del circuito y su respuesta en diferencia de fase, sin más que sustraer las pérdidas de los pasamuros, previamente caracterizados a temperaturas criogénicas. En la Fig. 7 se muestra el montaje de uno de los circuitos en el interior del criostato.

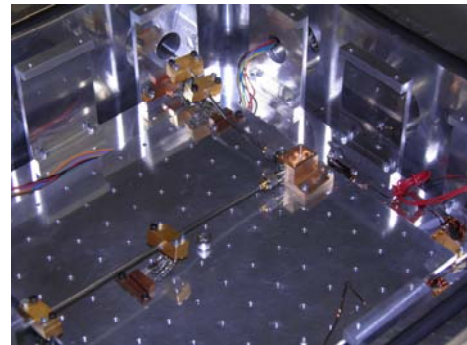


Fig. 7. Montaje en el interior del criostato

A. Conmutador de fase a diodo PIN

En las siguientes gráficas (Fig. 8 y Fig. 9) se muestran los resultados para una polarización total del circuito de $I_d=100\text{ mA}$. Las medidas están realizadas a una temperatura de 15 K. Durante el proceso de medida se aprecia que para estos valores de consumo la temperatura en el interior del criostato comienza a incrementarse, lo que es no deseable en el ámbito de radioastronomía por el incremento de la temperatura total de ruido del sistema.

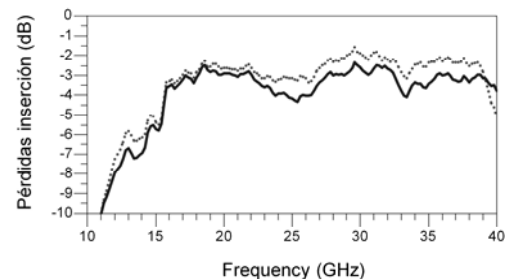


Fig. 8. Pérdidas de transmisión para ambos estados

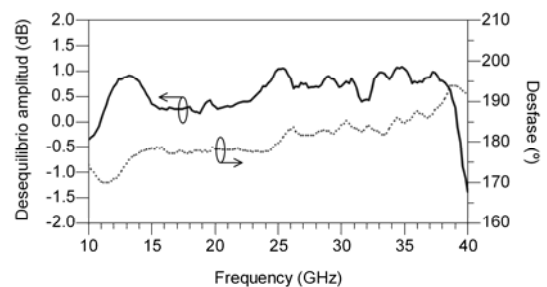


Fig. 9. Desequilibrio de amplitud (eje izquierdo) y cambio de fase (eje derecho)

B. Conmutador de fase a diodo Schottky

En el caso de diodos Schottky, se presentan los resultados para una polarización total del circuito de $I_d=40$ mA, sin llegar a producir variación en la temperatura. En las Fig. 10 y Fig. 11 se muestran los resultados con este diodo como conmutador. Las medidas que se presentan están realizadas a una temperatura física de 15 K.

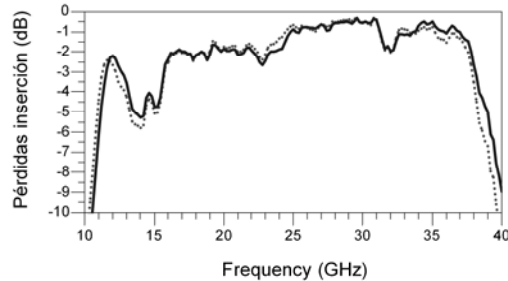


Fig. 10. Pérdidas de transmisión para ambos estados

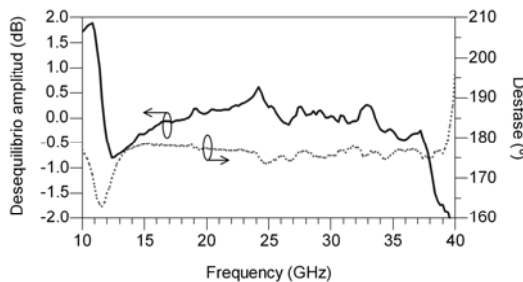


Fig. 11. Desequilibrio de amplitud (eje izquierdo) y cambio de fase (eje derecho)

C. Comparación resultados

En la siguiente tabla, Tabla 5, se presentan diferentes valores medidos para ambos diodos y el valor medio de las pérdidas.

Diodo	I_{TOTAL} (mA)	Pérdidas transmisión (dB)	Pérdidas transmisión banda 26-36 GHz (dB)
HPND-4005	100 mA	3	2.3
	60 mA	3.4	2.8
	20 mA	6	6.2
MA4E2037	40 mA	2	0.9
	20 mA	2.2	1
	10 mA	2.3	1.1

Tabla 5. Comparación resultados en función de la polarización

Se puede observar que para que el circuito tenga bajas pérdidas con diodos *p-i-n* se debe polarizar en un valor muy alto, no llegando a valores demasiado elevados para evitar el calentamiento del sistema con lo que la resistencia equivalente del diodo será algo más alta de lo que se muestra en la Fig. 4, mientras que con los Schottky se puede conseguir bajas pérdidas con un bajo consumo.

Los resultados con ambos diodos cumplen especificaciones en un ancho de banda suficientemente grande como para cubrir la banda de 26 a 36 GHz, consiguiendo un buen comportamiento en fase en un ancho de banda relativo superior al 40% en ambos casos. Para ambos diodos se obtiene un buen equilibrio entre ramas, así como un error en fase menor de 2°.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el estudio de dos tipos de diodos para trabajar como conmutadores en un circuito conmutador de fase 180° que trabaja a temperatura criogénica para un receptor de radioastronomía en banda Ka. Los resultados obtenidos a 15 K validan el uso de ambos, pero para el caso de radioastronomía los resultados se optimizan con el uso de diodos Schottky. El consumo obtenido para los diodos *p-i-n* en criogenia para aplicaciones de bajo ruido, hace que aumente la temperatura del receptor, con lo que se incrementaría la temperatura equivalente de ruido. Se han obtenido en ambos casos resultados válidos en fase, con un error menor de 2°. El ancho de banda de funcionamiento de ambos circuitos supera el 40% a 30 GHz.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia bajo el Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica AYA2007-68058-C03-03 y por el Ministerio de Ciencia e Innovación con el proyecto AYA2010-21766-C03-03.

La fabricación y montaje de los circuitos han sido realizados por Ana R. Pérez y Eva Cuerno. El mecanizado ha sido realizado por Santiago Cembellín, del Instituto de Física de Cantabria. Los autores quieren agradecer a Daniel Bruch, del Fraunhofer-IAF (Friburgo, Alemania), por su asistencia durante la medida de los diodos.

REFERENCIAS

- [1] P. Kangaslahti et al., "Planar Polarimetry Receivers for Large Imaging Arrays at Q-band", in *IEEE MTT-S International Symposium Digest*, Jun. 2006, pp. 89-92.
- [2] B. Aja, E. Artal, L. de la Fuente, J. P. Pascual, A. Mediavilla, N. Roddis, D. Kettle, W. F. Winder, L. Pradell, P. de Paco, "Very low-noise differential radiometer at 30 GHz for the PLANCK LFI", *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.*, Vol. 53, no. 6, pp. 2050-2062, Jun. 2005.
- [3] N. Jarosik, "The wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP): Using precision microwave measurements to study cosmology", en *13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting*, Feb. 2009.
- [4] N. C. Jarosik, "Measurements of the Low-Frequency-Gain Fluctuations of a 30-GHz High-Electron-Mobility-Transistor Cryogenic Amplifier", *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.*, Vol. 44, no. 2, pp. 193-197, Feb. 1996.
- [5] E. J. Wollack, "High-electron-mobility-transistor Gain Stability and its Design Implications for Wide Band Millimeter Wave Receivers", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 66, no. 8, pp. 4305-4312, Aug. 1995.
- [6] N. J. Simon, "Cryogenic properties of inorganic insulation materials for ITER magnets; A review", NIST, Boulder, CO, NISTIR 5030, Dec. 1994.
- [7] E. Villa, B. Aja, L. de la Fuente, E. Artal, "Wideband uniplanar 180° phase switch", *Electronics Letters*, Vol. 45, Issue 11, pp. 556-557, May. 2009.
- [8] R. Radebaugh, "Thermal conductance of indium solder joints at low temperatures", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 48, no. 1, pp. 93-94, Jan. 1977.